

УДК 533.6.071.4

МЕТОДИКА ОЦЕНКИ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ГАЗООБРАЗНЫХ ПРИМЕСЕЙ ОТ ТЕПЛОВЫХ ИСТОЧНИКОВ

Добросельский Константин Геннадьевич,

канд. техн. наук, доцент, ст. науч. сотр. лаборатории физических основ энергетических технологий Института теплофизики им. С.С. Кутателадзе СО РАН, Россия, 630090, г. Новосибирск, проспект Академика Лаврентьева, д. 1; ст. науч. сотр. отдела прикладной физики Новосибирского национального исследовательского государственного университета, Россия, 630090, г. Новосибирск, ул. Пирогова, д. 2. E-mail: dobroselsky@mail.ru

Актуальность работы обусловлена воздействием тепловых источников на окружающую среду посредством главным образом вредных газообразных примесей, которые необходимо контролировать.

Цель работы: построить достоверную модель распространения примесей в приземном воздухе и получить оценочную методику расчета концентраций примесей.

Методы исследования: геометрическое и динамическое подобие физической модели распространения струи в поперечном потоке и реального рассеяния летучих примесей для получения расчетной формулы концентрации вредного газа на разных расстояниях от источника выбросов.

Результаты: Разработана физическая модель распространения вредных газообразных примесей от вертикальных тепловых источников в приземном атмосферном слое. Получена эмпирическая формула, которая позволяет оценить концентрации газовых примесей на различных расстояниях от низких и средних источников выбросов. Приведены значения расстояний, на которых будет максимальная концентрация, для различных высот источников выбросов. Проведен сравнительный анализ методики авторов и одной из официальных методик расчета концентрации вредных примесей для одной из высот.

Ключевые слова:

Модель, газообразные примеси, струя, высота выбросов, концентрация.

Около половины загрязняющих атмосферу веществ приходится на долю газообразных примесей. Источниками загрязнения атмосферы дымовыми газами – продуктами сгорания – являются практически все тепловые двигатели и установки, сжигающие углеводородное топливо.

Исследования дымовых уходящих газов топливосжигающих установок показывают, что в их составе основными загрязнителями атмосферного воздуха являются оксиды углерода (до 50 %), оксиды серы (до 20 %), оксиды азота (до 6...8 %), углеводороды (до 5...20 %).

Газообразные примеси наиболее опасны для окружающей среды, так как трудно улавливаются и легко переносятся на большие расстояния. Распространенными источниками загрязнения атмосферы являются трубы.

Существующие модели и методики рассеяния газообразных примесей содержат большое количество параметров, зависимость которых от метеословий сложна и плохо изучена. Расчеты по ним сильно разнятся [1, 2]. Наибольшее число результатов получено для высоких источников вредных выбросов и далеко от них [3–7].

Большое воздействие на окружающую среду оказывают низкие и средние источники, в частности котельные, располагающиеся вблизи жилых и промышленных зон. Действие таких источников исследовано недостаточно. Данная работа частично восполняет этот пробел.

Предпосылки модели распространения газовых примесей.

1. Основными параметрами, влияющими на распространение газообразных примесей в атмосферном воздухе, являются направление и скорость ветрового потока, скорость выбросов [3, 8].
2. Выбросы газообразных примесей, скорость упорядоченного оседания которых практически равна нулю, – турбулентные струи, распространяющиеся в поперечном ветровом потоке.
3. Газовоздушную струю выбросов можно считать практически воздушной уже вблизи источника. Рассеяние примесей в атмосферном приземном слое осуществляется в конечном итоге под действием диффузии переносимой среды (ветрового, воздушного потока).
4. Подъем струи выбросов за счет избыточной температуры (плавучести) не учитывается [8].
5. Профиль концентраций газообразной примеси в факеле выбросов подобен профилю избыточных температур в поперечном сечении струи [9, 10].

Для моделирования рассеяния газообразных примесей в реальной атмосфере необходимо соблюдать механическое (физическое) подобие модели, под которым подразумеваются одновременно геометрическое, кинематическое и динамическое подобия [11, 12]. Выполнение полного подобия практически невозможно, однако и частичность его, тем более в случае развитых турбулентных течений, вполне достаточна в пределах качественной оценки рассеяния газообразных веществ. Более подробно корректность предложенного моделирования рассмотрена ниже.

Физическая модель изучаемого нами течения представляет собой воздушную осесимметричную струю, которая выбрасывается из трубы высотой $H=0,22...0,3$ м и диаметром $d=0,022$ м под прямым углом к направлению движения воздушного потока. На рис. 1 представлена полученная автором задымленная струя. Для исследования струи в сносимом потоке применялся аэродинамический канал [13] длиной 5,5 м и поперечным сечением 0,8·0,5 м.

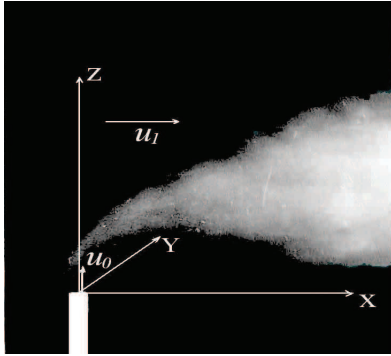


Рис. 1. Вертикальная струя в поперечном потоке

Исследования проводились для относительных скоростных напоров $q=0,85...6,12$ ($q=u_0^2/u_1^2$, где u_0 – максимальная скорость струи на срезе трубы; u_1 – скорость сносимого потока) с изотермическими и слабонеизотермическими (критерий Архимеда $Ar=(g\Delta T_0)/(2u_0^2 T_1)=2,8\cdot 10^{-4}...1,0\cdot 10^{-3}$, где $g=9,8$ м/с² – ускорение свободного падения; ΔT_0 – разность абсолютных температур в струе и сносимом потоке, К; T_1 – абсолютная температура потока, К) струями. Плотность, кинематическая вязкость струй и сносимого потока принимались одинаковыми (относительная погрешность этих величин для рассматриваемых разностей температур струи и потока не превышала 5 %).

Геометрическое подобие легко достижимо. Натурные диаметры источников выбросов (например, котельные, вентиляционные трубы) лежат в пределах 0,5...1,5 м. Для диаметра используемых нами модельных труб коэффициент $M_l=l_n/l_m\approx 23...68$ (l_n, l_m – какой-либо размер соответственно натуре и модели), что соответствует высотам реальных труб $H\approx 5...20$ м.

Масштаб скорости $M_u=u_n/u_m=1,6...6$ (u_n, u_m – характерные скорости исследуемых течений соответственно в натуре и модели), что соответствует скорости атмосферных течений 3...10 м/с и воздушному потоку в канале $u_1=1,7...1,9$ м/с. Отсюда скорость выбросов в натуре $u_n\approx 4...28$ м/с при скорости модельных струй (в устье источника) $u_0=2,4...4,7$ м/с.

Значения чисел Рейнольдса для воздушных струй, формирующихся в вертикальных трубах, составляли $Re_0=2,7\cdot 10^3...6,9\cdot 10^3$, где $Re_0=u_0 d/\nu$ (ν – кинематическая вязкость воздуха, м²/с). В центральной части канала был сформирован равномерный поток с числом $Re_1\approx 8,5\cdot 10^4$, где $Re_1=u_1 D/\nu$ (D – условный диаметр канала, который опреде-

лялся из равенства площадей поперечного сечения канала и круглой трубы: $a\cdot b=\pi D^2/4$. Откуда $D=\sqrt{(4ab)/\pi}\approx 0,71$ м).

Реальные атмосферные течения имеют числа $Re_1>10^5$, а струи газообразных выбросов – $Re_0>10^4$. Однако это неполное подобие чисел Рейнольдса для натуре и модели не оказывает серьезного влияния на достоверность модельного исследования, так как расширение струи не зависит от плотности, вязкости и числа Рейнольдса, если оно достаточно велико [10].

Реальная струя примесей достаточно быстро приобретает температуру, близкую к окружающей среде [14].

В [15] приведены расчеты, на основании которых сделано заключение, что при расчете возвышения струи над устьем источника нецелесообразно делать поправку на подъем струи за счет плавучести, а следует учитывать лишь подъем под влиянием динамических сил. Это обеспечит некоторый запас и большую надежность расчетов ожидаемых концентраций вредных веществ.

В работе [3] показано, что при увеличении скорости набегающего потока и других постоянных параметрах высота подъема факела резко уменьшается, и при скорости потока более 3 м/с уже не наблюдается значительного эффекта всплытия. В реальности скорости ветрового потока могут быть значительно выше. Там же приводятся данные по влиянию разности температур факела и потока на тепловой подъем, однако даже при разности температур $\Delta T=182$ К относительный тепловой подъем факела составляет всего единицу.

Одной из основных характеристик распространения выбросов от труб является определение эффективной высоты выброса с помощью выражений для подъема шлейфа (определение оси струи).

Измерения скоростного и температурного полей, визуальные наблюдения и фотосъемка задымленных струй показали, что наиболее достоверно ось струи описывается точками максимальной температуры в поперечных сечениях неизотермической струи. Было показано, что ось струи, построенная по максимальным температурам, лежит ниже построенной по максимальным скоростям [16, 17].

Для относительных скоростных напоров $q=2,0; 3,10; 5,55$ слабонеизотермической струи было получено эмпирическое выражение для точек максимальной температуры [16] (поднятие струи над источником):

$$\bar{z}_0 = q^{0,51} \bar{x}^{0,33}, \quad (1)$$

где $\bar{x}, \bar{z}_0$ – относительные координаты ($\bar{x}=x/d, \bar{z}_0=z_0/d$), отсчитываемые относительно устья источника (трубы); x, z_0 – координаты точек максимальной температуры в поперечных сечениях струи.

Считая, что профиль концентраций газообразной примеси подобен профилю избыточных температур в поперечном сечении струи, были определены границы теплового пограничного слоя струи.

На основе опытных данных был получен безразмерный профиль избыточной температуры в вертикальной плоскости XZ [18], который может быть представлен в виде:

$$\frac{t - t_1}{t_m - t_1} = \exp \left\{ - \frac{0,7}{\operatorname{tg}^2 \alpha_{0,5t}} \left(\frac{z - z_0}{x} \right)^2 \right\}, \quad (2)$$

где t – температура в измеряемой точке, °C; t_m – максимальная температура в рассматриваемом поперечном сечении струи, °C; t_1 – температура сносщего потока, °C; z – вертикальная координата измеряемой точки; $\operatorname{tg} \alpha_{0,5t}$ – тангенс угла α , образованного точкой половинной избыточной максимальной температуры и осью X в рассматриваемом поперечном сечении струи (рис. 2).

Вблизи источника были определены значения тангенсов отдельно выше ($\operatorname{tg} \alpha_{0,5t}^+$) и ниже ($\operatorname{tg} \alpha_{0,5t}^-$) оси в поперечных сечениях струи.

По этим опытным данным были получены эмпирические зависимости

$$\operatorname{tg} \alpha_{0,5t}^+ = \frac{0,39q^{0,43}}{\bar{x}^{0,75}} \quad \text{и} \quad \operatorname{tg} \alpha_{0,5t}^- = \frac{0,54q^{0,28}}{\bar{x}^{0,75}}. \quad (3)$$

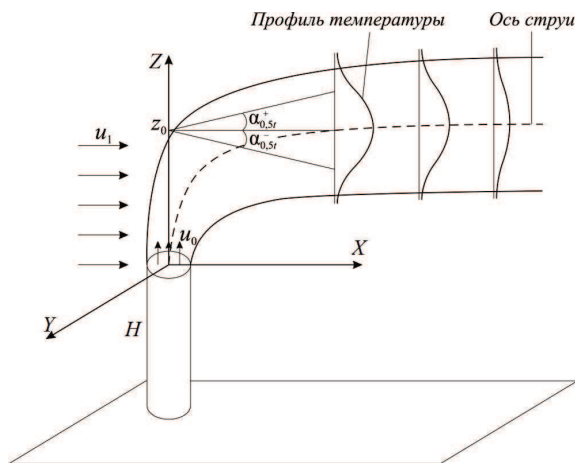


Рис. 2. Геометрические и кинематические характеристики струи

Используя приведенные выше рассуждения и зависимости, был построен профиль относительных, избыточных температур слабонеизотермических струй в горизонтальной плоскости XY .

$$\frac{t - t_1}{t_m - t_1} = \exp \left\{ - \frac{0,7}{\operatorname{tg}^2 \beta_{0,5t}} \left(\frac{y}{x} \right)^2 \right\}, \quad (4)$$

где $\operatorname{tg} \beta_{0,5t}$ – тангенс угла, образованного точкой половинной избыточной осевой температуры и осью X в рассматриваемом горизонтальном поперечном сечении струи; y – поперечная координата (рис. 1).

Для некоторых поперечных сечений ($\bar{x}=0,9...17,25$) были найдены значения тангенса угла $\beta_{0,5t}$, которые могут быть выражены зависимостью

$$\operatorname{tg} \beta_{0,5t} = \frac{0,29q^{0,86}}{\bar{x}^{0,75}}. \quad (5)$$

Для значений осевой относительной безразмерной температуры была получена зависимость [17], которая может быть представлена в виде ($\bar{x}=2,73...20,91$):

$$\frac{t_m - t_1}{t_0 - t_1} = \frac{1}{\bar{x}^{0,75}}, \quad (6)$$

где t_0 – температура в начальном сечении струи (в устье источника), °C.

Используя (2) и (6), можно получить выражение для профиля относительной температуры.

$$\frac{t - t_1}{t_0 - t_1} = \frac{1}{\bar{x}^{0,75}} \cdot \exp \left\{ - \frac{0,7}{\operatorname{tg}^2 \alpha_{0,5t}} \left(\frac{z - z_0}{x} \right)^2 \right\}. \quad (7)$$

На рис. 3 представлены профили температуры, построенные по (7), с использованием (1) и (3).

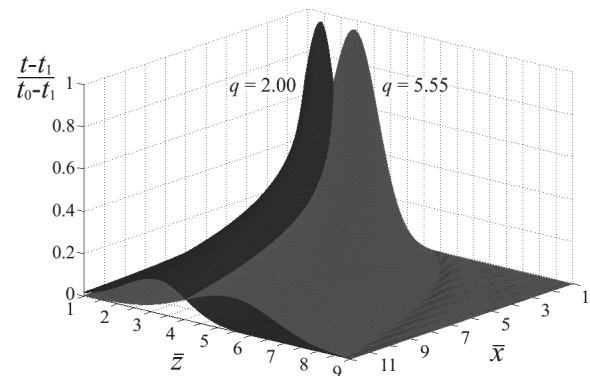


Рис. 3. Безразмерные профили температуры в плоскости XZ

Подобный профиль (рис. 3) будет и для относительной концентрации газообразных примесей, если сделать замену t (температура) на c (концентрация).

На основе (1)–(7) была получена формула для расчета концентрации c газообразных примесей, выбрасываемых в атмосферу через одиночные источники (трубы), считая фоновую концентрацию незначительной.

$$c = A(\bar{x}) \cdot c_0 \cdot \exp \left\{ \frac{-0,7}{\operatorname{tg}^2 \alpha_{0,5}} \left(\frac{\bar{z} - (\bar{z}_0 + \bar{H})}{\bar{x}} \right)^2 \right\} \times \exp \left\{ \frac{-0,7}{\operatorname{tg}^2 \beta_{0,5}} \left(\frac{\bar{y}}{\bar{x}} \right)^2 \right\},$$

где $A(\bar{x})$ определяется (6) при $\bar{x} < 20$ и $A(\bar{x}) = 2,1q^{0,3}/\bar{x}$ при $\bar{x} > 20$; c_0 – концентрация примеси в устье источника; $\bar{z}_0$ – положение осевой линии струи (точки максимальной температуры в поперечных сечениях неизотермических струй) выбросов относительно устья источника; $\bar{H} = H/d$ – относительная высота источника выбросов; $\bar{z} = z/d$ – вертикальная относительная координата, отсчитываемая относительно поверхности Земли; $\bar{y} = y/d$ – поперечная относительная координата; $\operatorname{tg} \alpha_{0,5}$, $\operatorname{tg} \beta_{0,5}$ – тангенсы углов, образованных точкой половинной избыточной максимальной температуры (концентрации) и продольной осью X , в рассматриваемом попереч-

Таблица. Концентрация газообразных примесей в точках касания струей выбросов поверхности Земли при заданных высотах труб и относительной скорости

q	$\bar{H}$					
	5	10	12,5	15	17,5	20
2,0	98/0,016	157/0,01	186/0,0084	216/0,0072	246/0,0064	275/0,0057
3,1	110/0,016	169/0,01	199/0,009	228/0,008	258/0,0069	288/0,006
5,55	133/0,016	192/0,011	221/0,0096	251/0,0085	281/0,0076	310/0,0069

ном сечении струи соответственно в вертикальной XZ и горизонтальной XY плоскостях.

Вблизи источника ($0 < \bar{x} < 20$) $\operatorname{tg} \alpha_{0,5}$ и $\operatorname{tg} \beta_{0,5}$ определяются (3) и (5) соответственно. Далеко от источника ($\bar{x} > 20$) $\operatorname{tg} \alpha_{0,5} \approx 0,10$, $\operatorname{tg} \beta_{0,5} \approx 0,12$ [18].

Используя математические преобразования можно получить оценочные значения концентраций газообразных примесей и на поверхности Земли ($\bar{z}=0$), определив предварительно место касания струи. Это будет происходить достаточно далеко от источника, где $\operatorname{tg} \alpha_{0,5} \approx 0,10$, $\operatorname{tg} \beta_{0,5} \approx 0,12$. Для конкретного значения q и относительной высоты трубы $\bar{H}$ можно найти подъем (шлейфа) струи ($\bar{z}_0 + \bar{H}$) над поверхностью Земли, определив сначала расстояние $\bar{x}_0$, когда подъем струи над источником будет максимальным, используя (3) для $\operatorname{tg} \alpha_{0,5}$ и приравняв его к 0,1 и далее, подставив в (1).

$$\bar{x}_0 = \left(\frac{0,54 q^{0,28}}{0,1} \right)^{4/3}, \quad \bar{z}_{\max} = q^{0,51} \bar{x}_0^{0,33}.$$

Продифференцировав выражение для концентрации (при $\bar{y}=0$ и $\bar{z}=0$)

$$\frac{c}{c_0} = \frac{2,1 q^{0,3}}{\bar{x}} \cdot \exp \left\{ \frac{-0,7}{\operatorname{tg}^2 \alpha_{0,5}} \left(\frac{(\bar{z}_{\max} + \bar{H})^2}{\bar{x}} \right) \right\}$$

и приравняв полученное выражение к нулю, можно определить место касания струи с поверхностью Земли ($\bar{x}_k$) и относительную концентрацию примеси $\bar{c}_k = c_k/c_0$ в этом месте.

В таблице приведены данные для координаты касания струи $\bar{x}_k$ и относительной концентрации примеси $\bar{c}_k$ (после косой черты) в зависимости от относительного динамического напора q и высоты источника выбросов $\bar{H}$.

Для сравнения были проведены расчеты по методикам ОНД-86 (пример 1 из приложения 3) [2]. Были взяты следующие условия: высота трубы источника выбросов $H=20$ м, диаметр трубы $D=1$ м,

скорость выхода газовой смеси $u_0=7$ м/с, перегрев газовой смеси $\Delta T=100$ К, скорость сносимого воздушного потока $u_1=4$ м/с. Коэффициент, зависящий от температурной стратификации $A=200$. Были получены следующие результаты: расстояние $x_m=252$ м от источника выбросов, на котором относительная приземная концентрация при неблагоприятных метеорологических условиях и опасной скорости ветра достигает максимального значения $c_m/c_0=2,93 \cdot 10^{-4}$; расстояние $x_{mu}=336$ м от источника выбросов, на котором при скорости ветра u_1 , отличающейся от опасной скорости ветра и неблагоприятных метеорологических условиях относительная приземная концентрация достигает максимального значения $c_{mu}/c_0=2,16 \cdot 10^{-4}$. Это соответствует нашим расчетам (таблица $\bar{H}=20$, $q \approx 3,1$) $\bar{c}_k=0,006$ и $\bar{x}_k=288$, что несколько отличается от полученных результатов по ОНД-86. Однако расчеты по нашим формулам достаточно просты и дают оценку верхней границы с некоторым запасом. Для холодных выбросов ($\Delta T \approx 0$) по ОНД-86 $c_m/c_0=0,92 \cdot 10^{-3}$, $x_m=114$ м, а $c_{mu}/c_0=0,68 \cdot 10^{-3}$, $x_{mu}=152$ м. Такое большое отличие в значениях x для холодных и нагретых выбросов маловероятно, принимая во внимание обзор литературы, приведенный выше.

В [7] проведен анализ применимости ряда наиболее известных методик расчета рассеивания вредных примесей в атмосфере в районе КАТЭК. Разброс получился большой как между отдельными методиками, так и с натурными измерениями, в десятки раз.

Выводы

Разработанная модель позволяет быстро оценить рассеивание газообразных примесей, распространяющихся от низких и средних источников высотой 5...20 м в воздухе и на поверхности Земли для скоростей ветровых потоков 3...10 м/с и скорости выбросов 4...20 м/с.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Защита атмосферы от промышленных загрязнений. Справ. изд.: в 2-х ч. Ч. 2. / пер. с англ. / под ред. С. Калверта, Г.М. Инглунда. – М.: Металлургия, 1988. – 712 с.
2. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий (ОНД-86). – Л.: Гидрометеоиздат, 1987. – 93 с.
3. Рихтер Л.А., Волков Э.П., Кормилицын В.И. Тепловой подъем газов из дымовых труб ТЭС // Теплоэнергетика. – 1973. – № 2. – С. 52–57.
4. Волков Э.П., Фаткуллин Р.М. Расчет поля среднегодовых приземных концентраций выбросов ТЭС // Теплоэнергетика. – 1983. – № 4. – С. 39–43.
5. Исследование подъема дымового факела над устьем газоотводящих труб ТЭС / С.А. Фадеев, Э.П. Волков, Е.И. Гаврилов, В.Б. Прохоров // Теплоэнергетика. – 1984. – № 1. – С. 57–59.
6. Егоров С.С., Гаврилов Е.И. Инженерная методика расчета приземных осредненных долгопериодных концентраций выбросов тепловых электростанций // Теплоэнергетика. – 1991. – № 4. – С. 66–69.

7. Волков Э.П., Гаврилов Е.И., Фаткуллин Р.М. Экспериментальная проверка методик расчета рассеивания в атмосфере вредных примесей от высотных источников в районе КАТЭК // Теплоэнергетика. – 1984. – № 6. – С. 45–48.
8. Лейкин И.Н. Проектирование вентиляционных и промышленных выбросов в атмосферу. – М.: Химия, 1970. – 132 с.
9. Аксенов А.А. Смещение газов при вдуве низконапорной струи в поперечный поток // Изв. РАН. Сер. МЖГ. – 1996. – № 3. – С. 67–74.
10. Рейнольдс А.Дж. Турбулентные течения в инженерных приложениях / пер. с англ. – М.: Энергия, 1979. – 408 с.
11. Мхитарян А.М. Аэродинамика. – М.: Машиностроение, 1976. – 448 с.
12. Седов Л.И. Методы подобия и размерности в механике. – М.: Наука, 1965. – 388 с.
13. Добросельский К.Г. Методика оценки распространения вредных выбросов от вентиляционных шахт и дымовых труб в приземном слое атмосферы: автореф. дис.... канд. техн. наук. – Владивосток, 1995. – 26 с.
14. Шагапов В.Ш., Гудкова О.С. Распространение паро-газокапельных струй в атмосфере // Изв. РАН. Физика атмосферы и океана. – 2001. – Т. 37. – № 3. – С. 313–321.
15. Андреев П.И. Рассеяние в воздухе газов, выбрасываемых промышленными предприятиями. – М.: Госстройиздат, 1952. – 90 с.
16. Добросельский К.Г. Геометрия слабонапорной струи в поперечном воздушном потоке // Теплофизика и аэромеханика. – 2001. – Т. 8. – № 2. – С. 199–203.
17. Добросельский К.Г. Вертикальная слабонапорная струя в поперечном потоке // Инженерно-физический журнал. – 2005. – Т. 78. – № 6. – С. 143–147.
18. Добросельский К.Г. Динамические и тепловые характеристики струи, вдуваемой по нормали к поперечному потоку // Теплофизика и аэромеханика. – 2004. – Т. 11. – № 1. – С. 79–86.

Поступила 10.09.2013 г.

UDC 533.6.071.4

METHOD FOR EVALUATING DISTRIBUTION OF GASEOUS IMPURITIES FROM HEAT SOURCES

Konstantin G. Dobroselsky,

Cand. Sc., Institute of Thermophysics of SB RAS,
Russia, 630090, Novosibirsk, Academician Lavrentyev avenue, 1;
National Research Novosibirsk State University, Russia, 630090, Novosibirsk,
Pirogov street, 2. E-mail: dobroselsky@mail.ru

Relevance of the work is caused by the influence of heat sources on the environment mainly by harmful gaseous impurities which must be monitored.

The main aim of the study is to build a reliable model of distribution of impurities in ground air and to obtain an evaluation methodology for calculating the concentrations of impurities.

The methods used in the study: the geometric and dynamic similarity of physical model of jet propagation in cross flow and real scattering of volatiles to obtain the calculation formula of harmful gas concentrations at different distances from the emission source.

The results: The authors have developed the physical model of distribution of harmful gaseous impurity extending from vertical thermal sources in a ground atmospheric layer. The empirical formula for calculating gas impurity concentration at different distances from low and average sources of emission was obtained. The paper introduces the values of the distances with maximum concentration for various heights of emission sources. The authors carried out the comparative analysis of personal method and one of the official methods for calculating the concentration of harmful impurities for one of the heights.

Key words:

Model, gaseous impurities, jet, height emissions, concentration.

REFERENCES

1. *Zashchita atmosfery ot promyshlennykh zagryazneniy* [Handbook of air pollution. P. 2] Ed. by S. Kalvert, H.M. Englund. Moscow, Metallurgiya, 1988. 712 p.
2. *Metodika rascheta kontsentratsiy v atmosfernom vozdukhue vrednykh veshchestv, soderzhashchikhsya v vybrosakh predpriyatiy (OND-86)* [The methods of calculating concentrations of harmful substances emitted by industrial enterprises in the atmospheric air (OND-86)]. Leningrad, Gidrometizdat, 1987. 93 p.
3. Richter L.A., Volkov E.P., Kormilitsyn V.I. Teplovoy podem gazov iz dymovykh trub TES [The heat-induced rise of flue gases from the chimney stacks of thermal power plants]. *Teploenergetika – Thermal Engineering*, 1973, no. 2, pp. 52–57.
4. Volkov E.P., Fatkullin R.M. Raschet polya srednegodovykh prizemnykh kontsentratsiy vybrosov TES [Calculations of the field of average annual ground level concentrations of the emissions from thermal power plants]. *Teploenergetika – Thermal Engineering*, 1983, no. 4, pp. 39–43.
5. Fadeev S.A., Volkov E.P., Gavrilo E.I., Prokhorov V.B. Issledovanie podema dymovogo fakela nad ustem gazootvodyashchikh trub TES [Investigation of a smoke plume rise above the mouth of gas-discharging chimneys of thermal power plants]. *Teploenergetika – Thermal Engineering*, 1984, no. 1, pp. 57–59.
6. Egorov S.S., Gavrilo E.I. Inzhenernaya metodika rascheta prizemnykh osrednennykh dolgoperiodnykh kontsentratsiy vybrosov teplovykh elektrostantsiy [The engineering methods of calculation of ground level averaged long-term concentrations of emis-

- sions from thermal power plants]. *Teploenergetika – Thermal Engineering*, 1991, no. 4, pp. 66–69.
7. Volkov E.P., Gavrilov E.I., Fatkullin R.M. Eksperimentalnaya proverka metodik rascheta rasseivaniya v atmosfere vrednykh primesey ot vysotnykh istochnikov v rayone KATEK [An experimental verification of the methods for calculating atmospheric dispersion of harmful impurities emitted from tall sources in the area of the Kansk-Achinsk coal basin]. *Teploenergetika – Thermal Engineering*, 1984, no. 6, pp. 45–48.
8. Leykin I.N. *Proektirovanie ventilyatsionnykh i promyshlennykh vybrosov v atmosferu* [Design of ventilation and industrial atmospheric emissions]. Moscow, Khimiya, 1970. 132 p.
9. Aksenov A.A., Gudkovskii A.V., Dyadkin A.A., Tishin A.P. Smeshenie gazov pri vduve nizkonapornoy strui v poperechny potok [Gas mixing on injection of a low head jet into the cross flow]. *Izv. RAN, Ser. MZhG – Mekhanika zhidkostey i gazov*, 1996, no. 3, pp. 67–74.
10. Reynolds A.J. *Turbulentnye techeniya v inzhenernykh prilozheniyakh* [Turbulent flows in engineering]. Moscow, Energiya, 1979. 408 p.
11. Mkhitarian A.M. *Aerodinamika* [Aerodynamics]. Moscow, Mashinostroyeniye, 1976. 448 p.
12. Sedov L.I. *Metody podobiya i razmernosti v mekhanike* [Dimensional and similarity method used in mechanics]. Moscow, Nauka, 1965. 388 p.
13. Dobroselskiy K.G. *Metodika otsenki rasprostraneniya vrednykh vybrosov ot ventilyatsionnykh shakht i dymovykh trub v prizemnom sloe atmosfery. Avtoreferat kand. nauk* [The procedure of evaluating the propagation of harmful emissions from ventilation shafts and chimney stacks in the ground level layer of the atmosphere. Abstract of Cand. Sc. Diss.]. Vladivostok, 1995. 26 p.
14. Shagapov V.Sh., Gudkova O.S. Rasprostraneniye paro-gazokapelnnykh struy v atmosfere [The propagation of vapor gas droplet jets in the atmosphere]. *Izv. RAN, Physics of the atmosphere and the oceans*, 2001, vol. 37, no. 3, pp. 313–321.
15. Andreev P.I. *Rasseyaniye v vozdukh gazov, vybrasyvaemykh promyshlennymi predpriyatiyami* [Atmospheric dispersion of gases emitted from industrial enterprises]. Moscow, Gosstroyizdat, 1952. 90 p.
16. Dobroselskiy K.G. Geometriya slabonapornoy strui v poperechnom vozdushnom potoke [Geometry of a low-head jet in the air cross flow]. *Teplofizika i aeromekhanika – Thermophysics and Aeromechanics*, 2001, vol. 8, no. 2, pp. 199–203.
17. Dobroselskiy K.G. Vertikalnaya slabonapornaya struya v poperechnom potoke [A vertical low-head jet in the cross flow]. *IFZh*, 2005, vol. 78, no. 6, pp. 143–147.
18. Dobroselskiy K.G. Dinamicheskie i teplovye kharakteristiki strui, vduvaemoy po normali k poperechnomu potoku [Dynamic and thermal characteristics of a jet injected normal to the cross flow]. *Teplofizika i aeromekhanika – Thermophysics and Aeromechanics*, 2004, vol. 11, no. 1, pp. 79–86.